第 38 卷第 4 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.38, No.4
2017 年 4 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Apr., 2017

平板热管内气液两相流动与传热的可视化实验研究

于 程[1] 刘向东[1,2] 张孟臣[1] 陈永平[1,2,3] 施明恒[1]

(1. 东南大学能源与环境学院，能源热转换及其过程测控教育部重点实验室， 南京 210096；
2. 扬州大学水利与能源动力工程学院， 扬州 225127；
3. 苏州科技大学环境科学与工程学院， 苏州 215009)

摘 要 本文基于高速摄像仪设计搭建了平板热管气液两相流动与传热的可视化平台，开展平板热管受限空间内气液两相工质运行状态和相变传热行为的可视化观测。 研究结果表明， 平板热管存在突然启动和渐进式启动两种启动方式，在高充液率情况发生突然启动，而在低充液率情况下发生渐进式启动。在准稳定运行阶段，蒸发面先处于能量积累状态，随后热量伴随着核态沸腾快速释放到冷凝面，热管蒸发段和冷凝段壁面温度表现出周期性的温度脉动变化。在热量积累过程中平板热管蒸发段与冷凝端之间的传热性能弱，在核态过程中蒸发段与冷凝端之间的传热性能强。

关键词 平板热管; 传热; 气液两相流; 相变; 可视化

中图分类号: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253–231X(2017)04–0807–04

Visualization Study of Vapor-liquid Two Phase Flow and Heat Transfer in Flat Plate Heat Pipe

YU Cheng[1] LIU Xiang-Dong[1,2] ZHANG Meng-Chen[1] CHEN Yong-Ping[1,2,3] SHI Ming-Heng[1]

(1. *Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing* 210096*, China;*
2. *School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou* 225127*, China;*
3. *School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou* 215009*, China*)

Abstract The vapor-liquid two phase flow and heat transfer in flat plate heat pipe is experimentally investigated by the use of a visualization system. The vapor-liquid two-phase hydrodynamics and phase-change heat transfer behaviors in the small confined space is observed. The results indicate that there exits two start-up types for the flat plate heat pipe, i.e. the sudden start-up type for the high water filling ratio and the gradual start-up type for the low water filling ratio. For quasi-steady state, the amount of energy is initially accumulated at the evaporation section, and then the energy is quickly transferred to the condensation surface during the nucleate boiling process. Evident temperature oscillations are observed on both the evaporation surface and condensation surface. During the energy accumulating process, the heat transfer between the evaporation surface and condensation surface is weak, however, the thermal performance during the nucleate boiling process is superior.

Key words flat plate heat pipe, heat transfer; vapor-liquid two phase flow; phase change; visualization

0 引 言

平板热管是解决受限微小空间内高热流密度器件设备散热的一种优选方案，在空间热控、电子元器件均温等领域有着广阔的应用前景 [1–3]。平板热管受限结构中的气液相变传热过程涉及气液相变、热量传递、两相流动、界面迁移以及气泡破裂聚并等热力学和动力学耦合输运机制 [4–6]。开展平板热管气液两相流动与相变传热研究对于揭示热管传热机理具有重要的科学意义 [7–8]。

Zhang 等 [8] 设计了一种磁流体蒸汽腔平板热管，腔体内填充磁性流体工质，并给出了此平板热管的最佳充液率。Hsieh 等 [9] 对以水为工质的无吸液芯平板热管传热性能进行了实验研究，分析了热负荷和工作温度对热管热阻和相变传热系数的影响。Rulliere 等 [10] 对带有槽道结构蒸发面平板热管

收稿日期: 2016-12-22; **修订日期**: 2017-03-23
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51406175)；江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20140488)
作者简介: 于 程 (1988–)，男，博士生，主要从事微尺度传热传质研究。 **通信作者**: 陈永平，教授，E-mail: ypchen@seu.edu.cn

传热性能进行了实验研究，获得了工质、槽道结构对平板热管传热性能的影响。目前已有的平板热管实验研究中，大多采用金属壳体，难以对腔体内发生的复杂气液相变流动与传热过程进行动态可视化观测，特别是对微小受限空间内发生的蒸发 - 凝结耦合相变传热机理缺少直观认识。

为此，本文设计并搭建了平板热管相变传热的可视化实验平台，实验观测运行过程中受限空间内出现的气液两相运行状态及传热行为，深入揭示蒸发/沸腾与凝结换热之间的相互作用机制。

1 实验系统与方法

实验系统主要由平板热管、可控加热器、冷却模块和数据采集仪等组成，如图 1 所示。平板热管由蒸发板、玻璃管、冷凝板及充液管组成。玻璃管两端分别与热管的蒸发板和冷凝板密封连接而构成一个密闭腔体，玻璃管内径为 44 mm，板间距 15 mm。采用可控加热器 (电加热棒 + 铜棒) 模拟高热流密度 (q) 电子器件热源，恒温流体循环器提供的恒温流体模拟冷源。采用热电偶测量热管蒸发段和冷凝段温度 (图 2)，采用高速 CCD(Photron FASTCAM SA4) 动态监测密闭腔体内气液相界面演化，直观认识平板热管内复杂气液两相流体动力行为以及蒸发–凝结耦合相变换热特性。

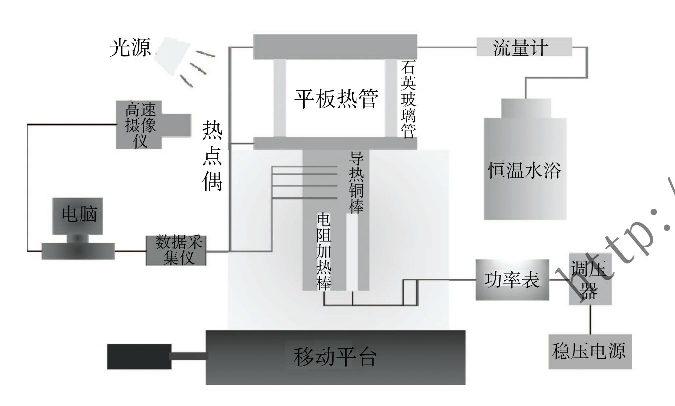


图 1 平板热管可视化实验系统原理图

Fig. 1 Schematic of experimental system

为监测平板热管工作时蒸发面和冷凝面的温度变化，在蒸发板和冷凝板上靠近蒸发面/冷凝面 2 mm 的截面上各配置一个热电偶，测温位置位于正方形横截面的中心点。图 2 给出了测温点在板上的位置分布，对蒸发板和冷凝板均适用，测温点到 x、y 轴的距离均为 27 mm，将热电偶连接数据采集仪后可测试蒸发面和冷凝面的温度动态分布。

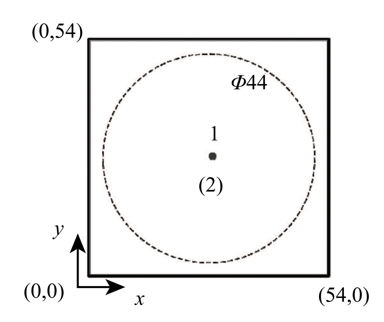


图 2 蒸发板和冷凝板测温点分布
(1 代表蒸发板测温点；2 代表冷凝板测温点)

Fig. 2 Temperature measuring points on the evaporation surface and condensation surface. (Point 1 on the evaporation surface; Point 2 on the condensation surface)

2 结果分析与讨论

从平板热管蒸发段加热开始，平板热管需要经历一个启动过程，而后达到最终的准稳定工作状态。平板热管启动过程是蒸发面逐渐由静止状态过渡到气泡产生、长大直至脱离壁面，并且加热面附近的液体在自然对流和气泡扰动的双重作用下形成一个复杂的气液两相流动与相变传热过程。本文实验采用工质为去离子水，冷凝端冷却水温 $T_c = 25°C$；冷凝端冷却水流量 80 mL/min。

2.1 启动特性

通过对腔体内气液两相流动可视化监测，并结合蒸发段和冷凝段的壁面温度变化，发现平板热管存在突然启动和渐进式启动两种启动方式。在高充液率 φ 情况发生突然启动，而在低充液率 φ 情况下发生渐进式启动。

如图 3 所示，对于突然启动方式，平板热管在外部热流作用下，初始阶段腔体内气液两相工质以自然对流换热方式吸收蒸发段传递的热量，蒸发段壁面温度快速升高。此后，温度继续升高，但上升速度逐渐减慢。在此过程中，平板热管内能量一直处于累积状态。随着时间的进行，当能量积聚到一定程度时，壁面过热度达到了产生核化泡的临界状态，蒸发面上开始产生气泡，并带动液面发生强烈扰动，蒸发段温度出现突然下降，冷凝段温度则相应的突然升高。蒸汽遇到冷凝面后冷凝形成液滴，蒸发段吸收的热量伴随着气泡的产生与蒸汽的凝结快速传输至冷凝段，随后两者温度逐渐达到平衡状态。

如图 4 所示，与突然启动方式不同，在渐进式启动方式下，加热开始不久 (约 200 s 时)，平板热管各工作段的温度就出现了明显的脉动现象，平板热管内就观察到了缓慢的气泡生成、长大并脱离加热

壁面的现象。随后，蒸发段和冷凝段的温度继续缓慢升高，气泡的生成数量和脱离频率不断增加；随着时间的推移，各工作段的温度逐渐趋于稳定，最终平板热管完成启动进入到稳定运行阶段，整个过程温度由初始时刻到稳定状态的变化是渐进式的。

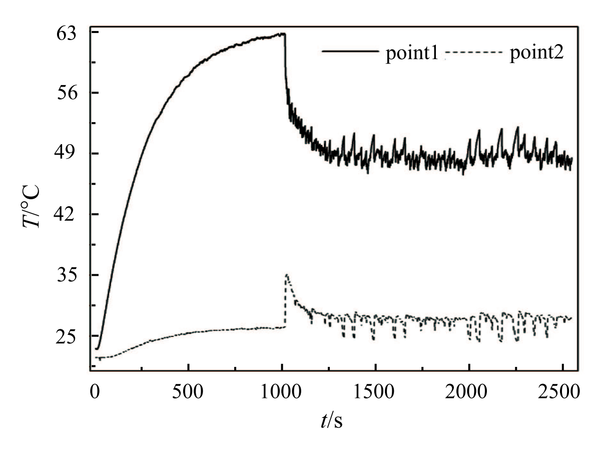


图 3 突然启动方式 ($\varphi = 73\%$; $q = 8.9$ W/cm^2)

Fig. 3 Sudden start-up type ($\varphi = 73\%$; $q = 8.9$ W/cm^2)



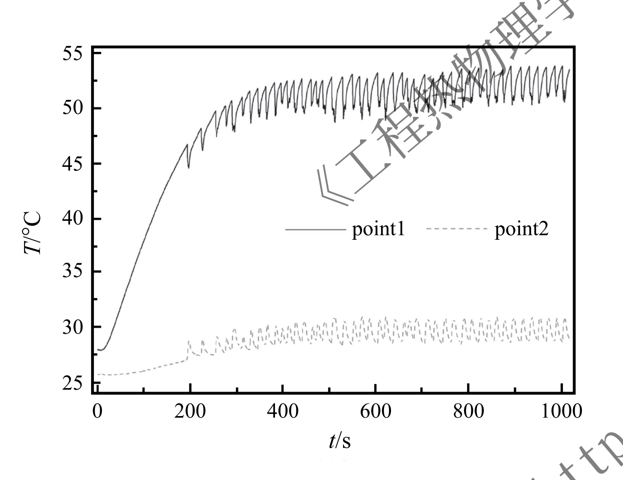


图 4 渐进式启动 ($\varphi = 47$ %; $q = 8.5$ W/cm^2)

Fig. 4 Gradual start-up type ($\varphi = 47$ %; $q = 8.5$ W/cm^2)

2.2 准稳定阶段

经历启动阶段后，平板热管内气液两相工质进入准稳定运行状态。如图 5 所示，蒸发面上气泡生成表现出比较明显的间歇性，热管蒸发段的能量依次经历积累–释放–再积累–再释放的过程，伴随此过程，腔内的气液两相工质处于沸腾–沸腾停滞–再沸腾–再停滞的交替运行状态。图 5 中的插图给出了气泡间歇运行过程中的壁面温度脉动变化，包含了脉动运行的四个周期，700 s 到 769 s 是其中一个运行周期。

图 6 给出了一个运行周期内每个温度变化阶段

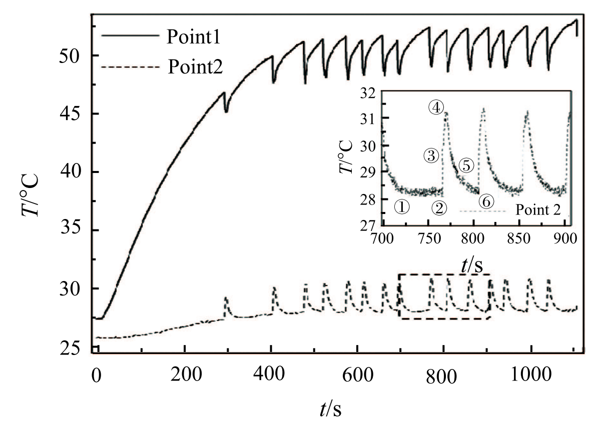


图 5 壁面温度脉动特征 ($\varphi = 47$ %, $q = 6.4$ W/cm^2)

Fig. 5 Temperature oscillations of the solid wall ($\varphi = 47$ %, $q = 6.4$ W/cm^2)

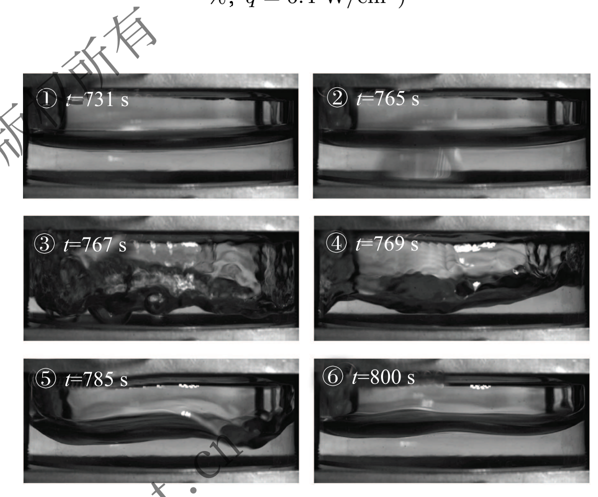


图 6 单个周期内气液两相行为 ($\varphi = 47$ %, $q = 6.4$ W/cm^2)

Fig. 6 Snapshot of vapor-liquid two phase flow for a period ($\varphi = 47$ %, $q = 6.44$ W/cm^2)

对应的气液两相行为的可视化图片。例如图 6 代表图 5 插图中 731 s 时刻蒸汽腔内的工质运行状态，依次类推。在此周期内，②点之前平板热管内一直处于能量积累状态 (如图 6 图像①所示)，此时腔内液面处于平静状态，蒸发面没有气泡产生；当能量积聚到一定程度后，壁面汽化核心活化，气泡瞬间从蒸发壁面上产生，并且快速生长、脱离壁面，蒸发段温度突然降低，同时冷凝段温度升高，即热量伴随着工质的相变过程由蒸发段快速传递到冷凝面。需要指出的是，气泡的连续产生过程非常短暂，如图 5 插图中②点 (765 s) 到④点 (769 s) 所示，即气泡的出现只维持了 4 s 的时间间隔。④点以后，气泡停止产生，⑤点时刻液面已经恢复平静状态，能量处于再积累阶段。等气泡再次产生，重复上述过程。总之，蒸发段壁面热量存在积累过程，同时积聚的热量伴随着核态沸腾可瞬间释放到冷凝段，从而不能形成

气泡的连续生成过程。因此，热管蒸发段和冷凝段温度表现出周期性的脉动变化。在热量积累过程中，平板热管蒸发段与冷凝端之间的传热性能弱，在核态过程中蒸发段与冷凝段之间的传热性能强。

3 结 论

本文设计搭建了平板热管内气液两相流动与相变传热的实验平台，开展了平板热管受限空间内气液两相工质运行状态和相变传热行为的可视化观测。研究结果表明：

1) 平板热管存在突然启动和渐进式启动两种启动方式。在高充液率情况发生突然启动，而在低充液率情况下发生渐进式启动。

2) 在准稳定运行阶段，蒸发段先处于能量积累状态，随后热量伴随着核态沸腾瞬间释放到冷凝面，热管蒸发段和冷凝段温度表现出周期性的动变化。

参 考 文 献

[1] Weibel J A, Garimella S V. Recent Advances in Vapor Chamber Transport Characterization for High Heat Flux Applications [J]. Advances in Heat Transfer, 2013, 45: 209–301

[2] Famouri M, Carbajal G, Li C. Transient Analysis of Heat Transfer and Fluid Flow in a Polymer-based Micro Flat Heat Pipe With Hybrid Wicks. International Journal of Heat and Mass Transfer [J], 2014, 70: 545–555

[3] Oro M V, Bazzo E. Flat Heat Pipes for Potential Application in Fuel Cell Cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 848–857

[4] Lips S, Lefèvre F, Bonjour J. Combined Effects of the Filling Ratio and the Vapour Space Thickness on the Performance of a Flat Plate Heat Pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(4): 694–702

[5] Zhang M, Liu Z, Ma G. The Experimental Investigation on Thermal Performance of a Flat Two-phase Thermosyphon [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(9): 1195–1203

[6] Chang J Y, Prasher R S, Prstic S, Cheng P, Ma H B. Evaporative Thermal Performance of Vapor Chambers Under Nonuniform Heating Conditions [J]. Journal of Heat Transfer, 2008, 130(12): 121501

[7] Wang C, Liu Z L, Zhang G M, Zhang M. Experimental Investigations of Flat Plate Heat Pipes With Interlaced Narrow Grooves or Channels as Capillary Structure [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 48: 222–229

[8] Ming Z, Zhongliang L, Guoyuan M, Cheng S Y. The Experimental Study on Flat Plate Heat Pipe of Magnetic Working Fluid [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(7): 1100–1105

[9] Hsieh S S, Lee R Y, Shyu J C, Chen S W. Thermal Performance of Flat Vapor Chamber Heat Spreader [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(6): 1774–1784

[10] Rullière R, Lefèvre F, Lallemand M. Prediction of the Maximum Heat Transfer Capability of Two-phase Heat Spreaders–experimental Validation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(7): 1255–1262